

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

**Návrh zjednodušené multi-dýzové stěny se zúženými
dýzami pro měření průtoku vzduchu**

Design of the Simplified Multi-Nozzle Wall with Conical
Nozzles for Air Flow Measurement

Student: Lukáš Juřica
Osobní číslo: JUR0363
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Zdeněk Šmída, Ph.D.

Ostrava 2020

Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Juřica**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R009 Provoz energetických zařízení
Téma: **Návrh zjednodušené multi-dýzové stěny se zúženými dýzami pro měření průtoku vzduchu**
Design of the Simplified Multi-Nozzle Wall with Conical Nozzles for Air Flow Measurement
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V teoretické části práce zpracujte rešerši na téma „Měření průtoku“ popište základní přístupy k měření především rozdíl mezi přímou a nepřímou metodou měření. Důraz klad'te na měření průtoku pomocí průřezových měřidel a to především škrticích orgánů pro měření tlakové difference. Závěrem se věnujte také proudění plynů a par dýzami.

V praktické části navrhnete zjednodušenou multi-dýzovou stěnu se zúženými dýzami pro měření průtoku vzduchu při zachování konstantního tlakového spádu trysek 0,8 při celém rozsahu měření od 12 000 kg/h do 1000 kg/h. Vstupní absolutní tlak vzduchu je 1,1 bar, vstupní teplota vzduchu je 20 °C. Navrhnete rozměry multi-dýzové stěny obdélníkového profilu při vhodné zvolené vstupní rychlosti proudění vzduchu. Vypočtete rozměry a počet zúžených dýz při požadavku měření s krokem 1000 kg/h. Další parametry potřebné pro výpočet si vhodné zvolte. V případě, modifikace zadání z důvodu optimalizace pracovního procesu své kroky detailně odůvodněte. Na závěr nakreslete výkres multi-dýzové stěny s návrhem uchycení do vzduchotechnického potrubí.

Seznam doporučené odborné literatury:

ĐAĐO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin, díl 3. ISBN 80-7300-156-X.
ČSN EN ISO 5167-1:2003 Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí kruhového průřezu průřezu - Část 1: Obecné principy a požadavky. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (unmz) Praha, 2003.
ČSN EN ISO 5801 (122014) Průmyslové ventilátory - Zkoušení výkonu s použitím normalizovaného vzduchovodu. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (unmz) Praha, 2009.
MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics – First Edition. New York: John Wiley & Sons, 1990, 840 p. ISBN: 0-471-57117-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Šmída**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18. 5. 2020

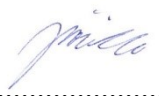


.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18. 5. 2020



.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Lukáš Juřica

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Bryksova 533/1, Slavonín,
783 01 Olomouc

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

JUŘICA, L. *Návrh zjednodušené multi-dýzové stěny se zúženými dýzami pro měření průtoku vzduchu: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2020, 43 s. Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Šmída, Ph.D.

Bakalářská práce je rozdělena na dvě části. První teoretická část se v úvodu zabývá metodami měření průtoku a v dalších kapitolách jsou popsány různé druhy průtokoměrů s důrazem hlavně na škrticí orgány pro měření tlakové difference. Druhá praktická část se zabývá návrhem zjednodušené multi-dýzové stěny se zúženými dýzami pro měření průtoku vzduchu.

KLÍČOVÁ SLOVA

dýza, průtokoměr, průtok, škrticí orgán

ANNOTATION OF THE BACHELOR THESIS

JUŘICA, L. *Design of the Simplified Multi-Nozzle Wall with Conical Nozzles for Air Flow Measurement: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, 2020, 43 pp. Supervisor: Ing. Zdeněk Šmída, Ph.D.

The bachelor thesis is divided into two parts. The first theoretical part deals with measurement methods in the introduction and in the next chapters various types of flow meters are described, mainly throttle devices with differential pressure measurement. The second practical part deals with the design of the simplified multi-nozzle wall with conical nozzles for air flow measurement.

KEYWORDS

nozzle, flow meter, flow, throttle device

Obsah

1.	Úvod.....	12
2.	Historie měření.....	13
3.	Měřicí metody	14
3.1	Základní pojmy	14
3.2	Přímá měřicí metoda	14
3.3	Nepřímá měřicí metoda.....	14
4.	Průtokoměry	15
4.1	Objemové průtokoměry	15
4.1.1	Oválný průtokoměr.....	15
4.1.2	Tělesový průtokoměr.....	16
4.1.3	Průtokoměr s kyvným diskem	16
4.1.4	Průtokoměr s oběžným kolem	17
4.1.5	Bubnový průtokoměr	18
4.2	Průtokoměry s měřením tlakové difference	18
4.3	Rychlostní průtokoměry.....	18
4.3.1	Pitotova trubice.....	18
4.3.2	Prandlova trubice.....	19
4.4	Průtokoměry se škrticími orgány	20
4.4.1	Venturiho trubice.....	20
4.4.2	Dallova trubice	21
4.4.3	Clona.....	21
4.4.4	Dýza.....	23
4.4.5	Zúžená dýza	23
4.4.6	Lavalova dýza.....	25
4.4.7	Multidýzy	27
4.4.8	Proudění plynů a par dýzami	27
5.	Praktická část	31
5.1	Určení maximálního průtočného průřezu.....	31
5.2	Výpočet rozměrů dýzy	32
5.3	Kontrola hmotnostních průtoků podle počtů dýz, dle rovnice (5.5)	34
5.4	Návrh 3D modelu dýzy	34
5.5	Návrh modelu dýzové stěny	35

Obsah

5.6	Vytvoření sestavy multi-dýzové stěny	36
5.7	Návrh otevírání dýz při měření	37
5.8	Montáž do vzduchotechnického potrubí	37
6.	Závěr	39
7.	Seznam použité literatury	41
8.	Seznam příloh.....	43

Seznam obrázků

Obr. 4.1: Oválný průtokoměr [6]	15
Obr. 4.2: Tělesový ("piškotkový") průtokoměr [7]	16
Obr. 4.3: Princip průtokoměru s kyvným diskem [4]	17
Obr. 4.4: Průtokoměr s oběžným kolem [4]	17
Obr. 4.5: Princip bubnového průtokoměru [8]	18
Obr. 4.6: Princip Pitotovy trubice [10]	19
Obr. 4.7: Schéma Pitotovy trubice [11]	19
Obr. 4.8: Prandlova trubice tvaru L [12]	20
Obr. 4.9: Venturiho trubice [9]	20
Obr. 4.10: Dallova trubice [4]	21
Obr. 4.11: Clona [6]	22
Obr. 4.12: Proudění a průběh tlaků na cloně [6]	22
Obr. 4.13: Dýza ISA 1932 [9]	23
Obr. 4.14: Zúžená dýza a průběh tlaku a rychlosti [16]	24
Obr. 4.15 i-s diagram pracovního procesu v zúžené dýze [20]	25
Obr. 4.16: Lavalova dýza (průběh tlaků a rychlostí) [21]	26
Obr. 4.17: i-s diagram pracovního procesu Lavalovy dýzy [20]	26
Obr. 4.18: Multidýzy [13]	27
Obr. 4.19: Redukovaná charakteristika dýzy [21]	28
Obr. 5.1: 3D model dýzy – pohled zepředu (autor)	35
Obr. 5.2 3D model dýzy – pohled z boku (autor)	35
Obr. 5.3: 3D model stěny – pohled zepředu a boční řez (autor)	36
Obr. 5.4: 3D model sestavy – pohled zepředu a z boku (autor)	36
Obr. 5.5: Návrh postupného otevírání dýz při měření (autor)	37

Seznam tabulek

Tab. 1: Zadané parametry (autor)	31
Tab. 2: Tabulka vnitřních rozměrů dýzy (autor).....	33
Tab. 3: Kontrolní výpočet dýz (autor).....	34

Seznam symbolů, veličin a zkratk

Značka	Veličina	jednotka
a	Délka	[m]
b	Výška	[m]
c	Šířka	[m]
d_1	Vstupní průměr	[m]
d_2	Výstupní průměr	[m]
L	Činná délka	[m]
\dot{m}	Hmotnostní průtok	$[kg \cdot h^{-1}]$
\dot{m}_{\max}	Maximální hmotnostní průtok	$[kg \cdot h^{-1}]$
Ma	Machovo číslo	[-]
p	Tlak	[Pa]
p_1	Vstupní tlak	[Pa]
p_2	Výstupní tlak	[Pa]
r	Měrná plynová konstanta pro suchý vzduch	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
S_2	Výstupní průřez	$[m^2]$
$S_{2,max}$	Maximální výstupní průřez	$[m^2]$
t	Tloušťka dýzy	[m]
t_d	Rozteč dýz	[m]
t_{ξ}	Rozteč šroubů	[m]
T	Termodynamická teplota	[K]
T_1	Termodynamická teplota na vstupu	[K]
T_2	Termodynamická teplota na výstupu	[K]
v	Měrný objem	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$
v_1	Měrný objem na vstupu	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$
v_2	Měrný objem na výstupu	$[m^3 \cdot kg^{-1}]$
w_1	Rychlost proudění na vstupu	$[m \cdot s^{-1}]$
w_2	Rychlost proudění na výstupu	$[m \cdot s^{-1}]$
α	Úhel zúžení dýzy	[°]
ε	Tlakový spád	[-]
κ	Poissonovo číslo	[-]

1. Úvod

Bakalářská práce se v teoretické části nejdříve zabývá historií měření, kde se stručně podívá na největší pokroky, které měly nějaký význam pro vývoj v metrologii. Poté se věnuje základním metodám měření, přičemž klade důraz na vysvětlení základních pojmů z analyzované problematiky. Dalším bodem jsou druhy průtokoměrů, kde jsou nejdříve popsány objemové průtokoměry, poté průtokoměry s měřením tlakové difference, a to hlavně průtokoměry ve formě škrťících orgánů vložených do potrubí zcela vyplněného měřenou tekutinou. Pořadí, ve kterém jsou průtokoměry popisovány je následující: Venturiho trubice, Dallova trubice a clony a nakonec dýzy, do jejichž kategorie spadají také multidýzy, které jsou hlavním předmětem této bakalářské práce. Jsou zde popsány hlavní parametry dýzy i s důrazem na jejich aplikaci. Poslední část teoretické části práce se zabývá prouděním plynů a par dýzami. Zde se na dýzy již nedívá jako na měřidla, ale jako na strojní součásti, ve kterých po celé délce dochází k expanznímu procesu. Důraz je v této části kladen na zúženou dýzu a Lavalovu dýzu, jejich charakteristiky a vzájemné rozdíly.

V praktické části je nejdříve ze zadaných parametrů vypočítán největší hmotnostní průtok, z čehož jsou pak určeny vnitřní rozměry dýzy pro největší hmotnostní průtok. Dále je určeno, kolik je třeba dýz na pokrytí rozsahu hmotnostních průtoků dle zadání. Dle toho jsou dále určeny vnitřní rozměry těchto dýz. Zbývající rozměry se vhodně zvolí a následuje vytvoření 3D modelu této dýzy v programu Autodesk Inventor Professional 2019. Následně se vhodně navrhne stěna, ve které budou dýzy uchyceny. Nakonec se navrhne montáž multi-dýzové stěny do vzduchotechnického potrubí a vypracují se výrobní výkresy součástí a sestavy.

2. Historie měření

Zájem o měření tekutin se datuje tisíce let před naším letopočtem, především v Egyptě, kde bylo zavlažování činností důležitou k přežití. Pravděpodobně první primitivní měřič vody byla hrubá forma hráze. [1]

Až do 15. století je zde nedostatek historických informací o měření průtoku. Nejspíše k žádnému většímu pokroku nedošlo, jelikož většina významných vztahů nebyla stále pochopena. Avšak od 15. století řada vědců pokročila v chápání průtokových jevů. [1]

V chápání vlastnostech tekutin se například zapříčinil Leonardo Da Vinci, jenž si uvědomoval vztahy mezi průtokem, velikosti potrubí a rychlosti tekutiny. Avšak neuvědomoval si dopad výšky hladiny na vlastnosti tekutiny. [1]

Později Benedette Castelli se taktéž zajímal o vlastnosti tekutin, ale ve výzkumu svých předchůdců nijak nepokročil. Nicméně Evangelista Torriceli, jenž pod ním studoval, zjistil, že na vodní sloupec působí tíha vzduchu neboli atmosférický tlak. Vymyslel tedy pokus, kde nahradí vodu rtutí a změří atmosférický tlak pomocí sloupce rtuti. Na základě tohoto pokusu vynalezl první barometr na světě. [1; 17]

Dále se v chápání tekutin zapříčinil Isaac Newton, který v tekutých tocích identifikoval hybné a třecí síly, i když většina teoretiků 18. století třecí síly zanedbávala. [1]

Roku 1738 vydal Daniel Bernoulli svou stěžejní knihu Hydrodynamika, kde shrnul výsledky svého výzkumu včetně nám známé Bernoulliho rovnice, a také jeho nadčasové teorii plynů. [18]

Hodně se zapříčinil i Giovanni Battista Venturi, který definoval tzv. Venturiho efekt, kdy proudící tekutina při průchodu menším průřezem musí zvýšit rychlost proudění, aby byl platný zákon zachování energie. [1]

V 19. století se rychlost objevování hodně zvýšila a na začátku 20. století už byla dobře zavedena věda o hydromechanice. Stejně tak už byla většina měřících přístrojů komerčně k dispozici. [1]

Ke konci 20. století už byl velký zájem o technologie zajímavící se o průtok tekutin, díky mnoha novým technologiím. Ohromný dopad na tuto metrologii měli hlavně pokroky v elektrotechnice. [1]

3. Měřicí metody

3.1 Základní pojmy

Měřicí metody chápeme jako způsoby, které využíváme k určování měřitelných veličin, jejichž část tvoří fyzikální veličiny. [2]

Fyzikální veličiny jsou veličinami, jenž se vyjadřují jistými přírodními jevy, na jejichž tezi je měření založeno. Tyto jevy označujeme jako fyzikální principy. Pokud se jedná o jev využitelný k měření, označujeme ho jako měřicí princip. [2]

Měřicí metody můžeme rozdělovat na obecné, jenž můžeme použít při měření zakládaných na různých principech a na metody specifické, které můžeme využít při jednom principu pouze na jednu veličinu. [2]

Dle výstupu měření odlišujeme metody přímé, kdy dostaneme rovnou údaj hodnoty měřené veličiny a nepřímé, kdy dostaneme údaj jiné veličiny, která je s měřenou veličinou ve známém vztahu. [2]

3.2 Přímá měřicí metoda

Přímá měřicí metoda byla definována jako metoda, u které údaj hodnoty měřené veličiny dostaneme přímo v příslušných jednotkách bez potřeby provádět další výpočty. Jako příklad je možno uvést měření elektrického proudu pomocí ampérmetru, měření hmotnosti pomocí váhy, nebo měření rozměru posuvným měřidlem atd. [2]

Za přímou měřicí metodu pokládáme i metody, u kterých čteme na stupnici nějaký číselný kód či údaj, které poté musíme převést na hodnotu měřené veličiny prostřednictvím tabulek či grafů. Tento způsob převádění hodnot se nepovažuje za výpočet. [2]

Za přímé měřicí metody lze pokládat i metody, které využívají automatická měřicí zařízení. Tato zařízení automaticky provádí měření hodnot různých veličin, a podle daných vztahů provádí vhodné výpočty a opravy. [2]

3.3 Nepřímá měřicí metoda

Nepřímou měřicí metodu uvádíme jako metodu, při níž je hodnota veličiny ustanovena dle výsledků měření veličin jiných druhů, jenž jsou k veličině, kterou chceme určit, vázány známými vztahy. [2]

K nepřímým měřicím metodám řadíme i metody, u kterých se přímo měří veličina jiného druhu než ta, kterou chceme zjistit a k vyhodnocení potřebujeme použít výpočet. [2]

4. Průtokoměry

Přístroje používané pro měření průtoku můžeme rozdělit dle různých aspektů. V principu však rozdělujeme průtokoměry na dva druhy. První objemové průtokoměry, které měří objem kapaliny, jenž projde přes měřidlo a druhé rychlostní průtokoměry, které měří rychlost proudění kapaliny. [3]

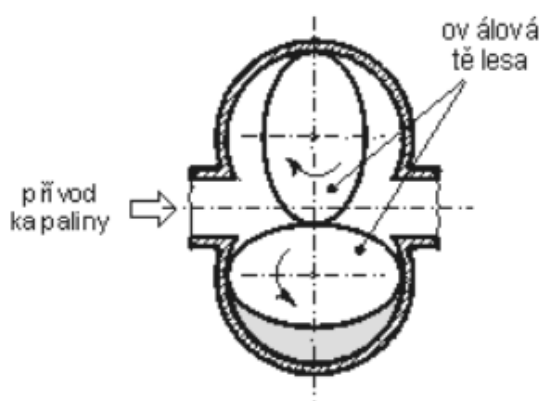
4.1 Objemové průtokoměry

Objemové průtokoměry, též nazývané jako hmotnostní průtokoměry jsou založeny na přímém měření objemu kapaliny. Jedná se tedy o objemový nebo hmotnostní průtok, který nám ukazuje kolik objemu či hmotnosti tekutiny nám projde potrubím za jednotku času. Jedná se o velmi přesné měření, proto se používají buď jako bilanční měření, či jako etalony k ověření jiných měřidel průtoku. [4;5]

Objemová měřidla můžeme rozdělit na měřidla spojitá a diskrétní. Měřidla spojitá pracují na principu nahromadění a vyprázdnění tekutiny v odměrném prostoru tak, aby byl průtok spojitý a my dosáhli plynulého měření. Po měření dostaneme údaje o počtu cyklů za jednotku času. Měřidla diskrétní fungují na podstatě dělení tekutiny na konečná kvanta neboli dávky. Tekutina je dělena na dávky, a je nucena vtékat do přesně vymezených prostorů, jenž se díky proudění vyprazdňují a znovu naplňují. Takto se tekutina rozdělí na dávky a počet těchto dávek nám určí průtok tekutiny. [4;5]

4.1.1 Oválový průtokoměr

Oválový průtokoměr se skládá z komory a ze dvou do sebe zapadajících oválných těles (viz. Obr. 4.1). Jejich pohyb je vázán ozubením na tělesech nebo pomocí užití ozubených kol. Proudící tekutina roztáčí tělesa a při otáčení vznikají mezi nimi a stěnou komory, střídavě se plnící a vyprazdňující prostory. [4;6]



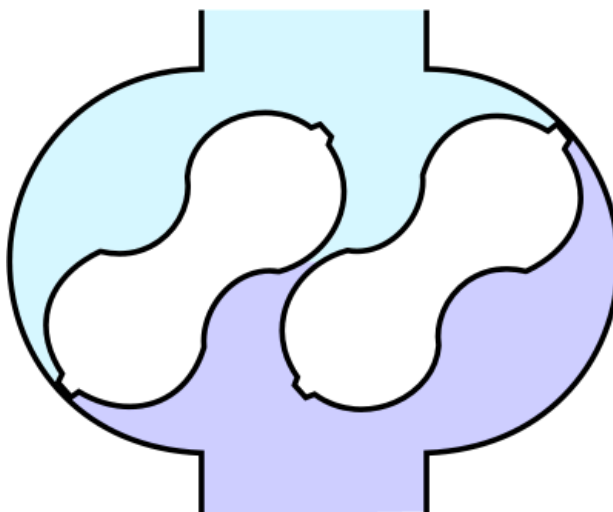
Obr. 4.1: Oválový průtokoměr [6]

Průtokoměry tohoto typu se používají především k měření organických produktů. Oválné průtokoměry jsou vhodné i k měření kapalin s větší viskozitou, proto jsou na zubech výřezy, aby se předešlo usazování velmi viskózních látek. [4;6]

Životnost oválných průtokoměrů je závislá hlavně na mazných schopnostech proudící kapaliny. [4;6]

4.1.2 Tělesový průtokoměr

Tělesový průtokoměr nazývaný též lalokový či piškotkový, je levnější formou oválného průtokoměru, jelikož místo výrobně náročnějších ozubených kol používáme dvě tělesa ve tvaru dětských piškotků (viz. Obr. 4.2). [4]



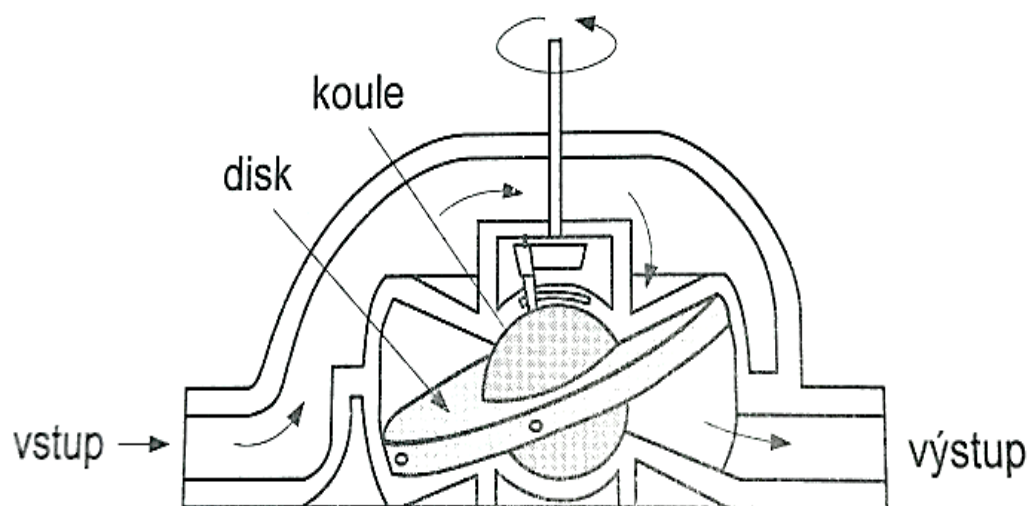
Obr. 4.2: Tělesový ("piškotkový") průtokoměr [7]

Stejně jako u oválných průtokoměrů proudící tekutina roztáčí tělesa a vytváří střídavě se plnící a vyprazdňující prostory. Jsou vhodné pro větší objemové průtoky. Jejich nevýhodou je velká nejistota při měření nižších objemových průtoků. [4]

4.1.3 Průtokoměr s kyvným diskem

Tyto průtokoměry patří k nejpoužívanějším průtokoměrům pro odběr vody. Proudící tekutina vteče do měřicí komory, čímž způsobí kývavý pohyb disku otáčející vřetenem. Vřeteno je magneticky spojeno s počítadlem. Průtokoměr zaznamená při každé otáčce objem tekutiny. Úhlová rychlost tekutiny je přímo úměrná průtoku tekutiny. Princip tohoto průtokoměru můžeme vidět na obrázku (viz. Obr. 4.3). [4]

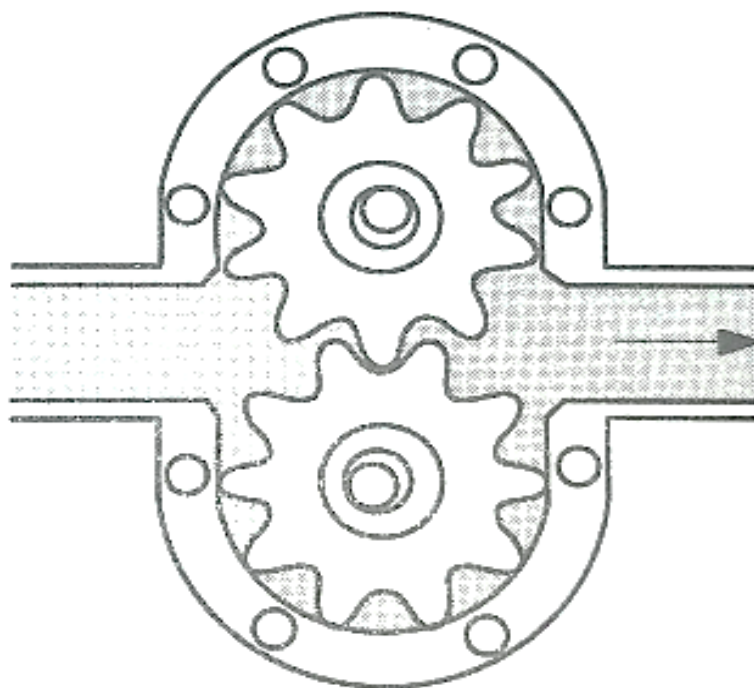
Pokud používáme průtokoměr pro vodu, tak jsou zaplavené části vyrobeny z materiálů, jenž vyhovují přísným hygienickým požadavkům (např. hliník, bronz). Kvůli magnetické vazbě je potřeba, aby použité materiály byly nemagnetické. [4]



Obr. 4.3: Princip průtokoměru s kyvným diskem [4]

4.1.4 Průtokoměr s oběžným kolem

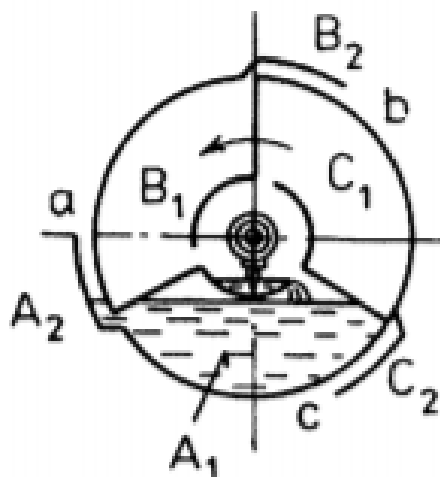
Proudící kapalina je zachycena pomocí zubů a dále vytlačována výtokovým otvorem. Počet otáček je zaznamenáván a každé otáčce náleží stálý objem měřené kapaliny. Tyto průtokoměry se používají převážně pro měření průtoku viskózních kapalin, ale mohou být vyráběny tak, aby vyhovovaly hygienickým předpisům pro měření mléka, čokolády atd. [4]



Obr. 4.4: Průtokoměr s oběžným kolem [4]

4.1.5 Bubnový průtokoměr

Bubnový průtokoměr je složen ze tří bubnů o stejném objemu. Na obrázku (viz Obr. 4.5) můžeme vidět, jak proudící tekutina přitéká potrubím do středu bubnu průtokoměru a stéká do prostoru A1. Po naplnění se tekutina dále dostává do prostoru A2, čímž se naruší stabilita a buben se začne otáčet. Tím se začne naplňovat prostor B1 a postup se opakuje. Tekutina, jenž byla odměřena odtéká otvory (viz. Obr. 4.5 (a, b, c)). Pohyb bubnu je snímán a výsledky jsou dále zpracovávány. [8]



Obr. 4.5: Princip bubnového průtokoměru [8]

Výhodou bubnových průtokoměrů je malá nejistota při menších průtocích a tlacích. Používají se hlavně k měření kondenzátu v elektrárnách a výtopnách. [4]

4.2 Průtokoměry s měřením tlakové difference

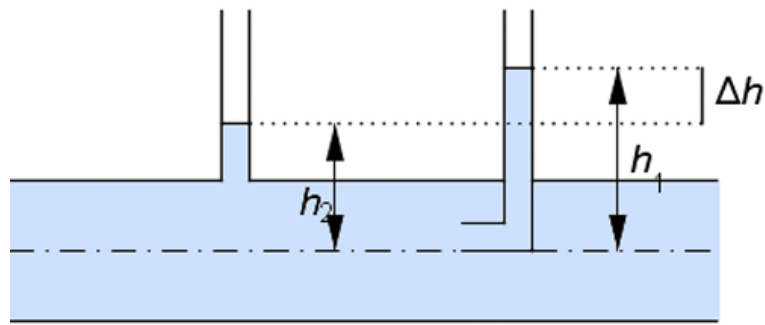
Tyto průtokoměry fungují na principu zachování energie formulovaném Bernoulliho rovnicí. Prouděním tekutiny vzniká kinetická energie, která zvyšuje dynamický tlak a snižuje statický tlak. Celkový tlak se však nemění. Rychlost proudění můžeme zjistit pomocí dynamického tlaku. Dynamický tlak můžeme určit jako rozdíl statického tlaku před a za překážkou, nebo jako rozdíl celkového tlaku a statického tlaku. [4]

4.3 Rychlostní průtokoměry

Rychlostní průtokoměry jsou nepoužívanějšími přístroji pro měření průtoku. Využívají závislosti dynamického tlaku proudící tekutiny na rychlosti proudění. [6]

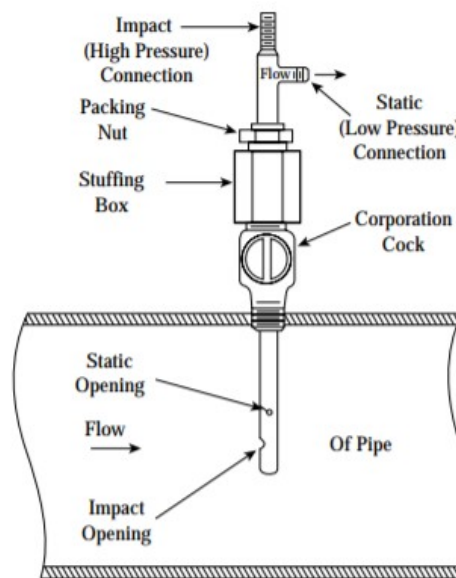
4.3.1 Pitotova trubice

Pitotova trubice se řadí mezi nejstarší a nejjednodušší rychlostní sondy. Jeho hlavním prvkem je úzká trubice otočená ústím proti směru proudění. Jelikož může dojít k zanesení otvorů trubice, používají se hlavně pro měření plynů nebo hodně čistých kapalin. [9]



Obr. 4.6: Princip Pitotovy trubice [10]

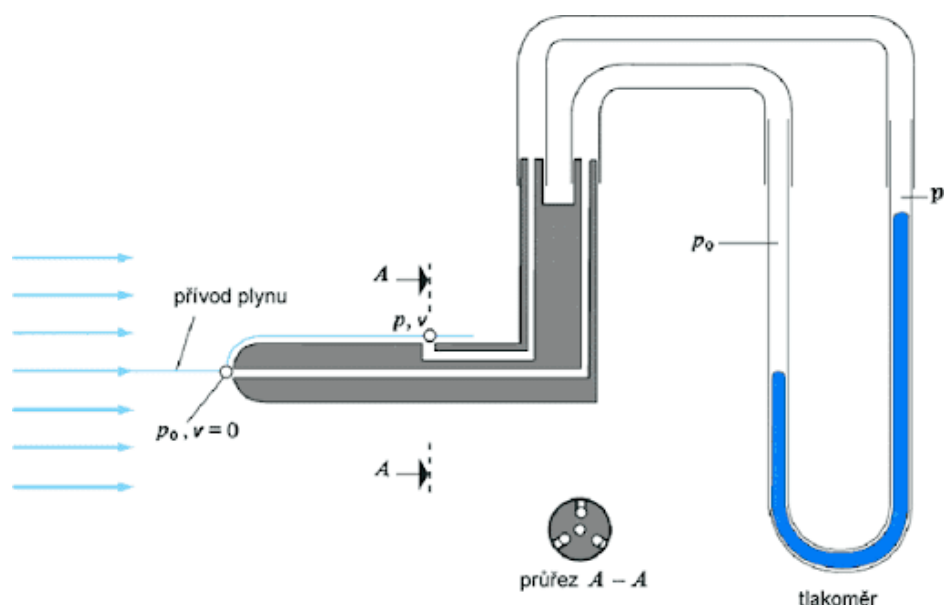
Pitotova trubice byla vynalezena roku 1732 Henrim Pitotem a je vyráběna v několika různých variacích. Na rozdíl od škrticích orgánů měří Pitotova trubice rychlost tekutiny v místě otvoru pro určení totálního tlaku. Schéma Pitotovy trubice můžeme vidět na následujícím obrázku (viz Obr. 4.7). [4]



Obr. 4.7: Schéma Pitotovy trubice [11]

4.3.2 Prandlova trubice

Jedná se o zvláštní uspořádání Pitotovy trubice, která je upravena tak, že se celkový a statický tlak měří přibližně ve stejném místě proudící tekutiny. Tvar Prandlovy trubice je založen na principu, že na vnějšku rotačního paraboloidu, blízko jeho vrcholu, je tlak nulový. Pro správné měření průtoku je potřeba zjistit z naměřených hodnot rychlostního profilu střední rychlost. Používají se k tomu graficko-početní metody pro kruhová potrubí. [12]



Obr. 4.8: Prandlova trubice tvaru L [12]

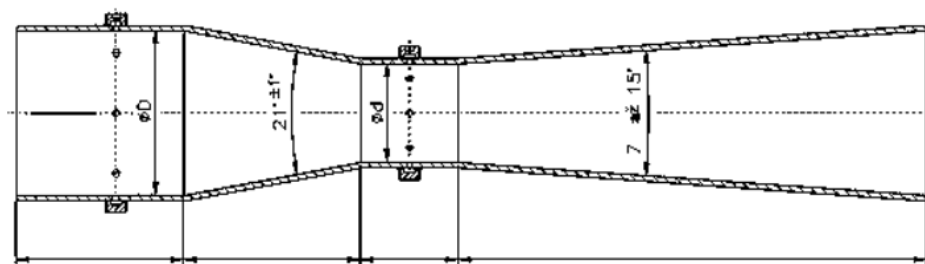
4.4 Průtokoměry se škrticími orgány

Určení průtoku ze ztrát naměřených v místě zúžení průřezu je založeno na Bernoulliho rovnici a je i v dnešní době jedna z nejvíce používaných metod měření průtoku v průmyslových aplikacích. Tekutina při průtoku škrticím orgánem nabývá kinetickou energii, čímž zrychluje a tuto energii získává díky poklesu statického tlaku v místě zúžení. [4]

Škrticí orgány můžeme dělit na dvě skupiny, základní a speciální škrticí orgány. Základní škrticí orgány lze řešit pouze počtově bez nutnosti provádět kalibrační měření. Patří mezi ně centrický kruhová clona, dýza a Venturiho trubice. Speciální škrticí orgány nelze řešit pouze výpočtem, ale většinou je nutné provést kalibrační měření. Mezi tyto průtokoměry patří např. čtvercová clona, nebo čtyřhranná Venturiho trubice. [6]

4.4.1 Venturiho trubice

Ve Venturiho trubici je tekutina zrychlena v konfuzoru, což vyvolává pokles statického tlaku. Potom se v difuzoru tlak téměř vrátí na úroveň tlaku před zúžením. Výhodou Venturiho trubice je malá tlaková ztráta a vyšší přesnost měření. Nevýhodou je však vysoká cena, a proto se využívá velmi málo. [9]

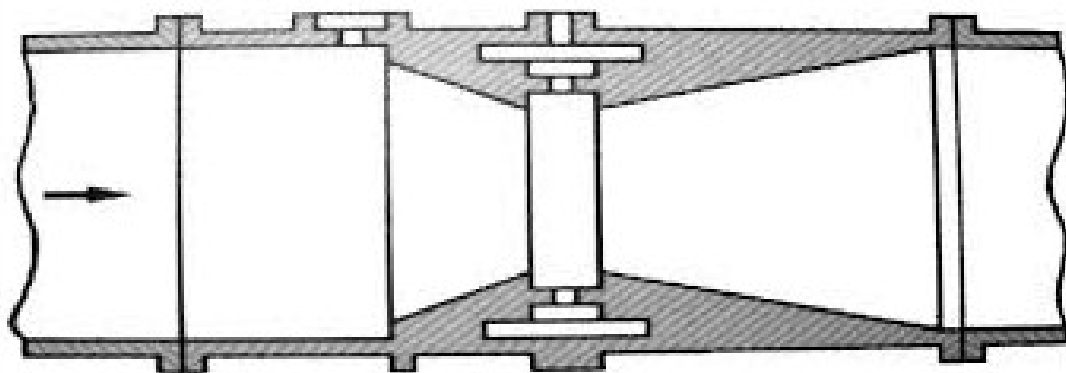


Obr. 4.9: Venturiho trubice [9]

Klasická Venturiho trubice je nejčastěji používána pro čisté, nekorodující plyny a kapaliny. Často se také využívá zkrácená nebo univerzální Venturiho trubice. Ve zkrácené Venturiho trubici máme zvětšen úhel vstupní části a tlakové komory jsou zjednodušeny na prosté přívody k senzoru tlakové difference. Jsou zde nižší pořizovací náklady a tlakové otvory se dají snáze čistit nebo se dají nahradit chemickým těsněním. Univerzální Venturiho trubice má nižší ztrátu tlaku než zkrácená či klasická a její pořizovací náklady jsou rovněž nižší. [4]

4.4.2 Dallova trubice

Dallova trubice se podobá tvarem Venturiho trubici, avšak je kratší a nemá žádné výrobně těžší zaoblené úseky. Je vhodná pro větší průtoky (např. odpadové kanály, kaly), tam, kde se nedají použít běžné clony. [4]

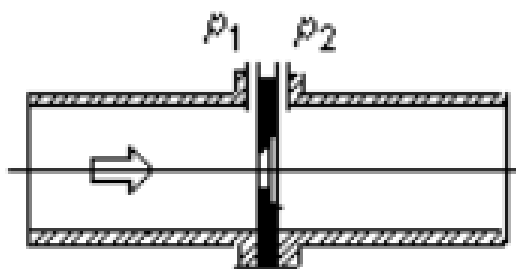


Obr. 4.10: Dallova trubice [4]

4.4.3 Clona

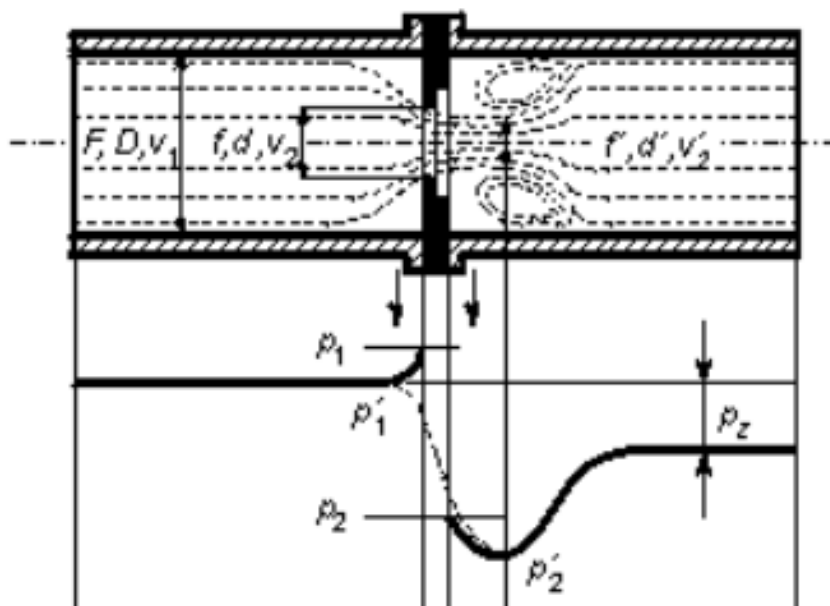
Clona je plochá kovová deska, která je vložena v potrubí mezi přírubami kolmo na směr proudění. Slouží ke zmenšení průřezu, průměr škrticího otvoru a jeho umístění závisí na druhu měřené tekutiny. Měření statických tlaků se provádí těsně před a za clonou (viz Obr. 4.11) [4;9]

Pokud clonu správně nainstalujeme a dodržíme geometrii škrticího otvoru během provozu, jsme schopni dosáhnout nejistot v řadách zlomků procenta. Vyrábí se pro všechny běžné světlosti potrubí. [4]



Obr. 4.11: Clona [6]

Dle Bernoulliho rovnice je každá změna rychlosti proudění doprovázena adekvátní změnou statického tlaku, tudíž se jedná o vratné jevy. Zvýšení rychlosti proudění vyvolá snížení dynamického tlaku a zvýšení statického tlaku a obráceně. Avšak z důvodu tření tekutiny o stěny potrubí vznikají trvalé tlakové ztráty, jelikož tření přeměňuje energii v teplo. Tím vzniká trvalá ztráta tlaku p_z [Pa]. Tuto ztrátu můžeme zmírnit jedině vyhlazením stěn potrubí. Na následujícím obrázku (viz Obr. 4.12) je možné si všimnout vzniklé tlakové ztráty. [4]



Obr. 4.12: Proudění a průběh tlaků na cloně [6]

Clony se většinou vyrábí z nerezových ocelí. Rozměry a všechny významné parametry jsou normalizovány. [4]

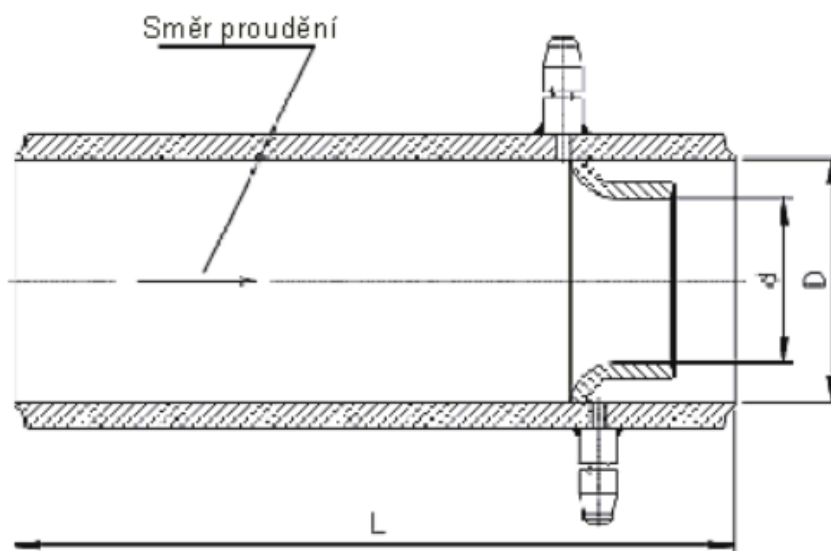
4.4.4 Dýza

Dýza je strojní součást, kde po celé délce dochází k přeměně tlakové energie na energii kinetickou. Ideální stavovou změnou pro dýzu je změna izoentropická. [16]

Rozdílem tlaků před a za dýzou je vyvolána expanze. Při expanzi dochází mimo poklesu tlaku, také ke zvýšení rychlosti a k velkému poklesu teploty. V extrémních případech může při poklesu teploty dojít až k zamrznutí média v dýze. [16]

Dle rychlosti, která dosáhne v dýze, je možno rozlišit dva základní typy dýz. První Lavalova dýza (nadkritická) a druhá zúžená dýza (podkritická). Více je o této problematice napsáno v podkapitole 4.4.8. [21]

Dýzy ve formě měřidel průtoku jsou v podstatě kompromisem mezi Venturiho trubicí a clonou. Dýza na rozdíl od Venturiho trubice nemá difuzor. Dýzy jsou schopné měřit větší průtoky než clony, a také zvládají měřit průtok u tekutin, jenž obsahují větší pevné částice. [9]



Obr. 4.13: Dýza ISA 1932 [9]

Nároky na přesnost rozměrů dýzy jsou menší, a proto jsou i levnější než clony a Venturiho trubice, ale jsou méně přesné. Dýzy jsou využívány hlavně pro vysoké teploty a vysoké rychlosti proudění tekutiny. Dosáhne-li však rychlost proudění v hrdle trysky rychlosti zvuku, rychlost už poté neklesá ani při poklesu tlaku v místech po proudu a proudění tekutiny se tzv. udusí. Tohoto úkazu využíváme u přesného měření, kalibrace nebo cejchování průtokoměru plynu. [4]

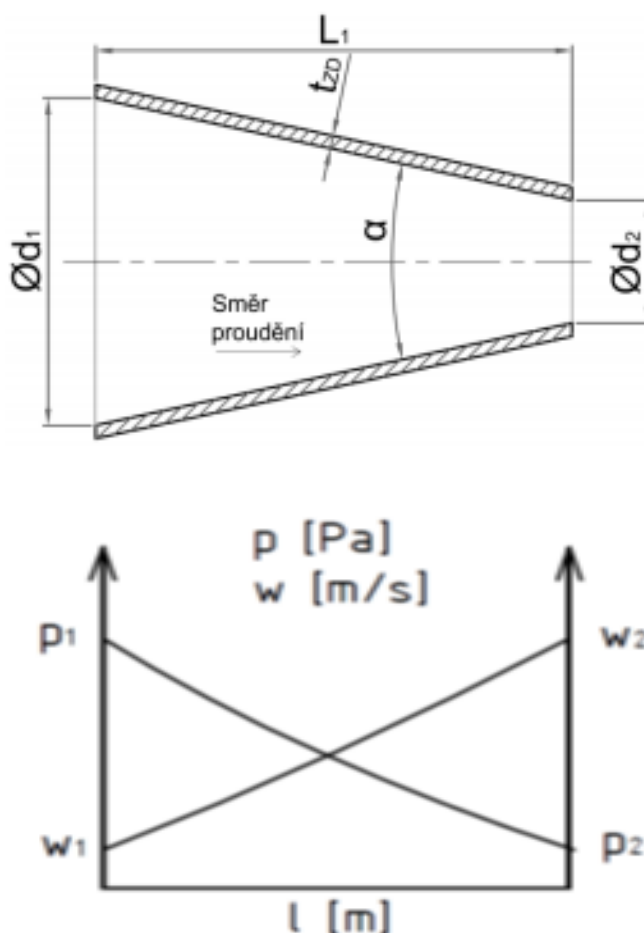
Dýzy mají menší tlakovou ztrátu než clony, ale větší než Venturiho trubice. Dýza je do potrubí instalována převážně v horizontální poloze. Vertikální poloha je však vhodná pro měření průtoku vlhké páry, plynu, nebo kapaliny s částicemi pevných látek. [4]

4.4.5 Zúžená dýza

Jestliže tekutina v dýze nedosahuje kritických parametrů, využívá se zúžená dýza. Pokud však dojde k překročení kritického bodu, rychlost už se dále nemůže zvýšit více než na rychlost zvuku $Ma = 1$. Tudíž pracovní látka dále neexpanduje a hmotnostní tok i rychlost zůstávají konstantní. [16]

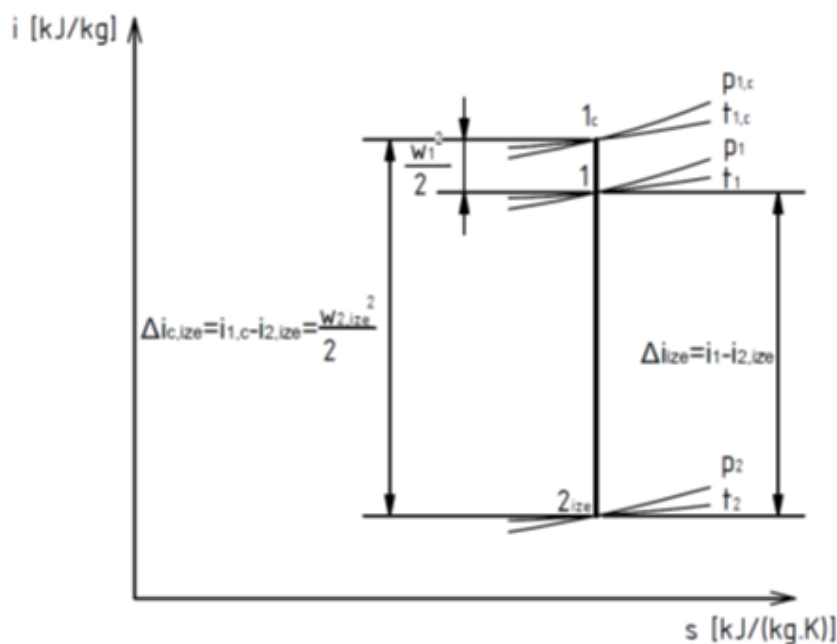
Z konstrukčního hlediska o velmi jednoduchou součást, která má většinou tvar zužujícího se kužele s konstantním úhlem zúžení $\alpha = 10 \div 14[^\circ]$ (viz Obr. 4.14). Délka dýzy se stanovuje ze vstupního a výstupního průměru, dle rovnice (4.1). [16]

$$L = \frac{d_1 - d_2}{2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (4.1)$$



Obr. 4.14: Zúžená dýza a průběh tlaku a rychlosti [16]

Rychlost tekutiny na výstupu z dýzy $w_2 [m \cdot s^{-1}]$ závisí na vstupním tlaku p_1 [Pa] a výstupním tlaku p_2 [Pa] (viz Obr. 4.15). [20]

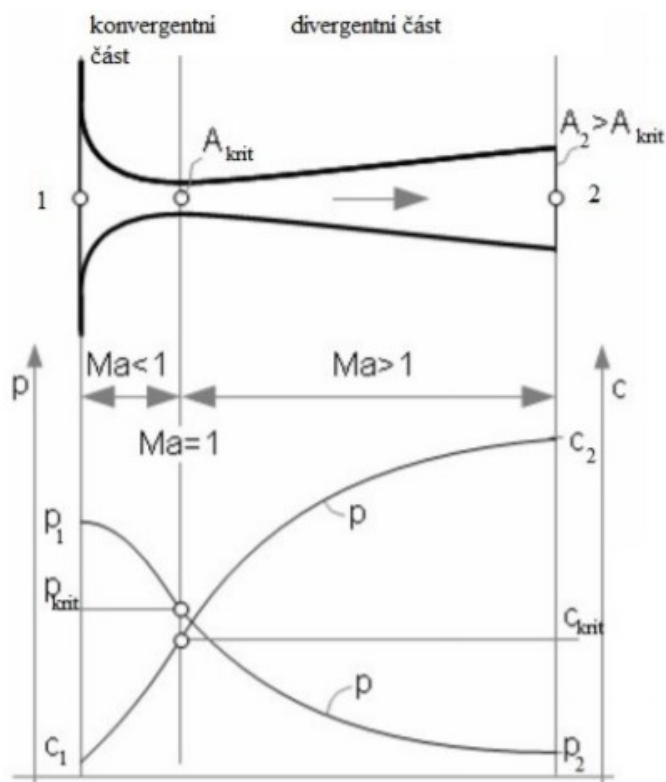


Obr. 4.15 i-s diagram pracovního procesu v zúžené dýze [20]

4.4.6 Lavalova dýza

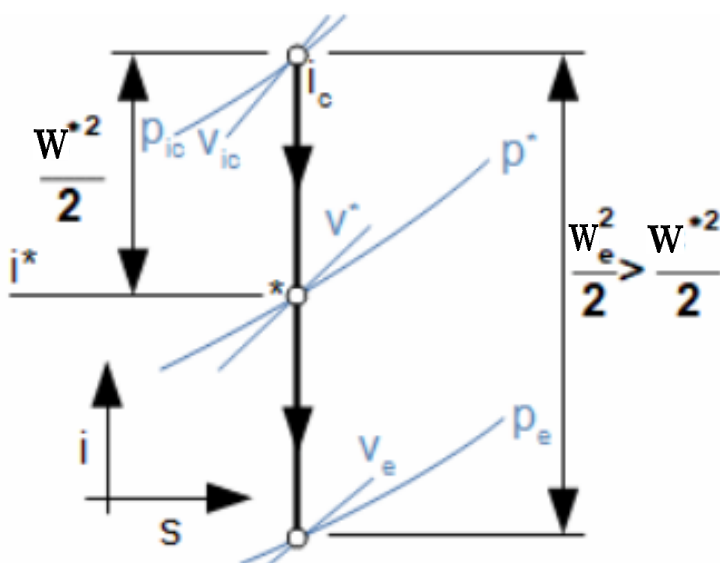
Lavalova dýza je využívána pro dosažení nadkritické rychlosti. V základu se skládá ze dvou částí. Zúžená dýza (konvergentní část trysky) a na ní navazující rozšířená část (divergentní část trysky). Na diagramu (viz Obr. 4.16) je možno vidět průběh expanze v dýze. V konvergentní části, která tedy představuje klasickou zúženou dýzu, je dosaženo podzvukové rychlosti $Ma < 1$, v nejužším průřezu je dosaženo rychlosti zvuku $Ma = 1$. Pokud však v nejužším průřezu nebude dosaženo rychlosti zvuku, tak se v divergentní části rychlost proudění nebude dále zvyšovat, ale vlivem ztrát bude rychlost naopak klesat. Proto je při návrhu Lavalovy dýzy důležité dbát na to, aby v nejužším průřezu bylo dosaženo kritické rychlosti proudění. Ve skutečnosti je ovšem vlivem ztrát zvuková rychlost dosažena až těsně za nejužším průřezem v divergentní části dýzy. [20,21]

Pro dosažení nadkritické rychlosti je nutné rozšířit zúženou dýzu o rozšiřující se část. Rozšiřující (divergentní) část dále přeměňuje tlakovou energii na energii kinetickou, čímž umožňuje dosáhnout nadkritické rychlosti $Ma > 1$. [16]



Obr. 4.16: Lavalova dýza (průběh tlaků a rychlostí) [21]

Je vidno, že i-s diagram Lavalovy dýzy má totožný tvar jako i-s diagram zužující se dýzy, rozdílem je, že má jasně vyznačené kritické parametry proudění. V diagramu jde vidět, že rychlost na výstupu je větší než rychlost v kritickém bodě, a to z důvodu nadzvukového proudění v divergentní části. [20]

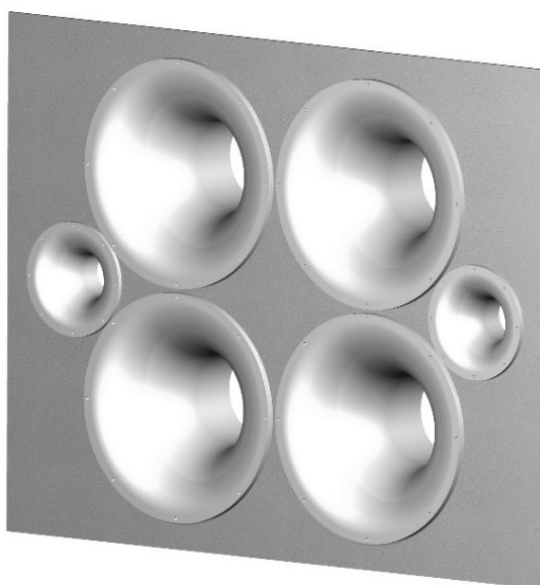


Obr. 4.17: i-s diagram pracovního procesu Lavalovy dýzy [20]

4.4.7 Multidýzy

Důvodem vynalezení multidýzy bylo vytvoření průtokoměru pro více trysek v jedné komoře tak, aby bylo možno pokrýt širší měřicí rozsah. Výhodami multidýzy je vyšší přesnost, snadná použitelnost, či dlouhá životnost. Z hlediska kvality měření, údržby a provozu jsou multidýzy vhodné pro specializovaná průmyslová zařízení (kalibrace kompresorů, proudových strojů), tak i jako zkušební měřidlo pro sériovou výrobu vzduchových zařízení. [13,18]

Široké využití našly i v odvětvích jako je ropný průmysl, chemický průmysl, hutnictví nebo lehký průmysl. Konstrukčně jsou multidýzy provedeny tak, že více dýz (i jiných průměrů) je namontovaných na jedné desce (viz Obr. 4.18). [13,18]



Obr. 4.18: Multidýzy [13]

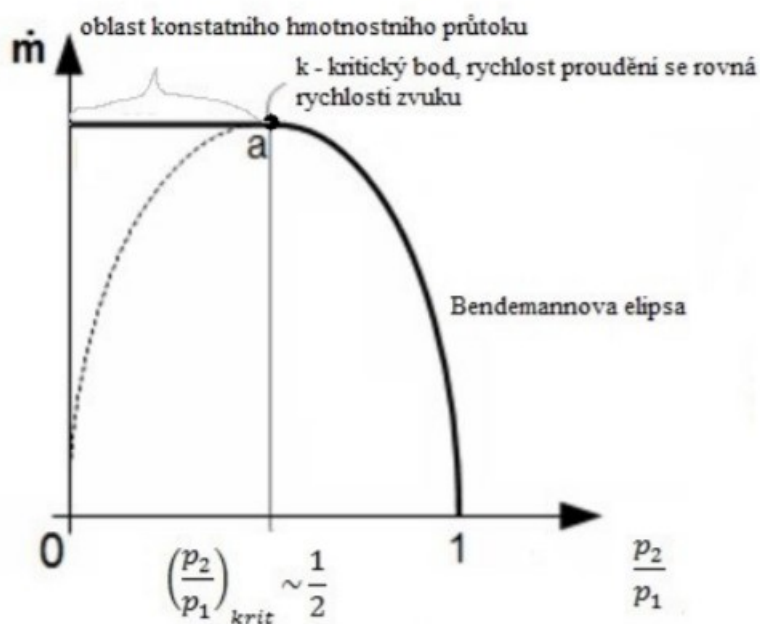
Materiálově jsou dýzy vyrobeny z nerezové oceli, hliníkové slitiny nebo i z tvrzeného plastu. Úchytná deska bývá vyráběna z uhlíkové oceli nebo z tvrzeného plastu. [13]

Multidýzy fungují na principu, že mají daný svůj minimální a maximální hmotnostní průtok, který mohou měřit. Pokud je však potřeba změřit hmotnostní průtok mezi těmito dvěma hodnotami, docílíme toho uzavřením (“zašpuntováním”) některých dýz, aby nám zbývající dýzy udávaly právě ten průtok, jenž chceme měřit.

4.4.8 Proudění plynů a par dýzami

Dýza je v podstatě kanál s plynulou změnou průtočného průřezu. Jak již bylo řečeno, při proudění tekutiny v dýze dochází především k poklesu tlaku a teploty a ke zvýšení kinetické energie. Tento děj nazýváme expanze. [20]

Redukovaná charakteristika dýzy nám udává závislost tlakového poměru k hmotnostnímu průtoku dýzy (viz Obr. 4.19).



Obr. 4.19: Redukovaná charakteristika dýzy [21]

Na obrázku (viz Obr. 4.19) je vidět, že pokud bude hmotnostní tok roven nule, pak je tlakový poměr roven jedné, tudíž expanze nebude vyvolána. Expanze vyvolána rozdílem tlaků na vstupu a na výstupu je tedy způsobena:

- Nárůstem tlaku na vstupu dýzy
- Poklesem tlaku na výstupu dýzy
- Obojím zároveň

Tlakový poměr dosahuje hodnot menších než jedna. Tlak na vstupu je vyšší než tlak na výstupu. Entalpie obou prostředí, jenž dýza spojuje, jsou tím pádem rozdílné. Tento rozdíl entalpií vyvolává nárůst rychlosti proudění. [16]

$$i_1 + \frac{1}{2} \cdot w_1^2 = i_2 + \frac{1}{2} \cdot w_2^2 \quad (4.2)$$

$$w_2 = \sqrt{2 \cdot (i_1 - i_2) + w_1^2} \quad (4.3)$$

$$w_2 = \sqrt{2 \cdot \Delta i_1 + w_1^2} \quad (4.4)$$

Důležitým kritériem je také tvar dýzy, jelikož aby dýza plnila svou funkci a docházelo k expanzi, musí po celé délce zužovat svůj průřez. [16]

$$S_2 = \frac{\dot{m}_{1,ize}}{w_{2,1} \cdot \rho_{2,1}} = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \quad (4.5)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot \dot{m}_{1,ize}}{\pi \cdot w_{2,1} \cdot \rho_{2,1}}} \quad (4.6)$$

$$d_2 < d_1$$

Růst hmotnostního toku s klesáním tlakového poměru není lineární. Tuto závislost nám v grafu popisuje tzv. Bendemannova křivka (viz. Obr. 4.19). Hmotnostní tok roste, dokud nedosáhne bodu, za kterým se i přes klesající tlakový poměr nemění a zůstává konstantní. Tento bod se nazývá Kritický bod. [16]

Kritický bod je dán vlastnostmi proudící tekutiny a v podstatě udává okamžik, kdy proudící tekutina dosáhne místní rychlosti zvuku. Kritický bod je definován tzv. kritickými parametry, kterými jsou např. kritická rychlost, teplota, tlak nebo hustota. [16]

Kritická rychlost:

$$r \cdot \rho_{krit} \cdot T_1 = p_1 \cdot \left(\frac{p_k}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad (4.7)$$

$$r = \frac{p_1 \cdot \left(\frac{p_{krit}}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}}}{\rho_{krit} \cdot T_1} \quad (4.8)$$

$$w_{krit} = \sqrt{k \cdot r \cdot T_{krit}} \quad (4.9)$$

Kritická teplota:

$$\frac{T_{krit}}{T_1} = \frac{2}{\kappa+1} \quad (4.10)$$

$$T_{krit} = \frac{2 \cdot T_1}{\kappa+1} \quad (4.11)$$

Kritický tlak:

$$\frac{p_{krit}}{p_1} = \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (4.12)$$

$$p_{krit} = p_1 \cdot \left(\frac{2}{\kappa+1}\right)^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (4.13)$$

Kritická hustota:

$$\frac{\rho_{krit}}{\rho_1} = \left(\frac{p_{krit}}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.14)$$

$$\rho_{krit} = \rho_1 \cdot \left(\frac{p_{krit}}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} \quad (4.15)$$

Umístění kritického bodu v grafu redukované charakteristiky dýzy nejbližše stanovuje kritický tlakový poměr (4.16). [16]

$$\frac{p_k}{p_1} \cong 0,5 \quad (4.16)$$

Obvykle se kritický poměr pohybuje okolo hodnoty 0,5. Pokud je tlakový poměr menší než 0,5, tak rychlost na výstupu nepřesahuje místní rychlost zvuku. Pokud je tlakový poměr větší než 0,5, tak má proudění potenciál přesáhnout místní rychlost zvuku. [16]

Prvořadým kritériem definující nadkritické či podkritické proudění je takový poměr absolutních tlaků na vstupu a na výstupu dýzy, který nám po porovnáním s kritickým tlakovým poměrem určí, jakou dýzu je třeba použít.

Proudění podkritické:

$$\frac{p_2}{p_1} > \frac{p_{krit}}{p_1} \quad (4.16)$$

Proudění nadkritické:

$$\frac{p_2}{p_1} < \frac{p_{krit}}{p_1} \quad (4.17)$$

V předešlých podkapitolách bylo také zmíněno Machovo číslo Ma [-], jenž je jedním ze základních pojmů v této problematice. Machovo číslo nám udává poměr mezi rychlostí proudění w [$m \cdot s^{-1}$] a rychlostí zvuku v daném prostředí (kritická rychlost) w_{krit} [$m \cdot s^{-1}$] viz rovnice (4.16). [21]

Rychlost zvuku je funkcí stavových veličin, jako je Poissonova konstanta κ [-], měrná plynová konstanta r [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] a absolutní teplota plynu T [K]. Rychlost zvuku se vypočítá dle rovnice (4.9). [21]

$$Ma = \frac{w_2}{w_{krit}} \quad (4.16)$$

5. Praktická část

Zadání:

Navrhněte zjednodušenou multi-dýzovou stěnu se zúženými dýzami pro měření průtoku vzduchu při zachování konstantního tlakového spádu trysek 0,8 při celém rozsahu měření od 12 000 $[kg \cdot h^{-1}]$ do 1000 $[kg \cdot h^{-1}]$. Vstupní absolutní tlak vzduchu je 1,1 [bar], vstupní teplota vzduchu je 20 $[^{\circ}C]$. Navrhněte rozměry multi-dýzové stěny obdélníkového profilu při vhodné zvolené vstupní rychlosti proudění vzduchu. Vypočtěte rozměry a počet zúžených dýz při požadavku měření s krokem 1000 $[kg \cdot h^{-1}]$. Další parametry potřebné pro výpočet si vhodně zvolte. V případě, modifikace zadání z důvodu optimalizace pracovního procesu své kroky detailně odůvodněte. Na závěr nakreslete výkres multi-dýzové stěny s návrhem uchycení do vzduchotechnického potrubí.

Tab. 1: Zadané parametry (autor)

				Převod jednotek	
Tlakový spád trysek	ε	0,8	[-]		
Maximální Hmotnostní tok	\dot{m}_{max}	12000	$[kg \cdot h^{-1}]$	3,33333	$[kg \cdot s^{-1}]$
Vstupní absolutní tlak	p_1	1,1	[bar]	110000	[Pa]
Vstupní teplota vzduchu	T_1	20	$[^{\circ}C]$	293,15	[K]
Poissonovo číslo	κ	1,4	[-]		
Měrná plynová konstanta	r	287,1	$[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$		

5.1 Určení maximálního průtočného průřezu

Vstupní měrný objem $v_1 [m^3 \cdot kg^{-1}]$ se vypočte pomocí stavové rovnice pro ideální plyn (5.1), ze vstupního absolutního tlaku p_1 [Pa], vstupní teploty vzduchu T_1 [K] a měrné plynové konstanty pro vzduch $r [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$.

$$v_1 = \frac{r \cdot T_1}{p_1} \quad (5.1)$$

$$v_1 = \frac{287,1 \cdot 293,15}{110000}$$

$$v_1 = \underline{\underline{0,765 [m^3 \cdot kg^{-1}]}}$$

Výstupní tlak p_2 [Pa] se spočítá z tlakového spádu ε [-] a vstupního tlaku p_1 [Pa] z rovnice (5.2).

$$p_2 = p_1 \cdot \varepsilon \quad (5.2)$$

$$p_2 = 110000 \cdot 0,8$$

$$p_2 = \underline{\underline{88000[Pa]}}$$

Teplota na výstupu $T_2[K]$ se vypočítá podle izoentropické změny z teploty na počátku komprese $T_1 [K]$, Poissonova čísla $\kappa [-]$, tlaku na vstupu $p_1 [Pa]$, tlaku na výstupu $p_2 [Pa]$ z rovnice (5.3).

$$T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot T_1 \quad (5.3)$$

$$T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \cdot 293,15$$

$$T_2 = \underline{\underline{275,04[K]}}$$

Výstupní měrný objem $v_2 [m^3 \cdot kg^{-1}]$ se vypočítá dle izoentropické změny ze vstupního měrného objemu $v_1 [m^3 \cdot kg^{-1}]$, Poissonova čísla $\kappa [-]$, teploty na vstupu $T_1 [K]$, teploty na výstupu $T_2 [K]$ z rovnice (5.4).

$$v_2 = \frac{v_1}{\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{1}{\kappa-1}}} \quad (5.4)$$

$$v_2 = \frac{0,765}{\left(\frac{275,04}{293,15}\right)^{\frac{1}{1,4-1}}}$$

$$v_2 = \underline{\underline{0,897[m^3 \cdot kg^{-1}]}}$$

Maximální průtočný průřez $S_{2,max} [m^2]$ je určen dle rovnice (5.5) z maximálního hmotnostního toku $\dot{m}_{max}[kg \cdot h^{-1}]$, měrného objemu na výstupu $v_2 [m^3 \cdot kg^{-1}]$ a rychlostí $w_{2,ize} [m \cdot s]$, jenž je zvolena dle tabulek MAFLEXU pro vysokotlaké rozvody $w_{2,ize} = 25 [m \cdot s]$. [15]

$$S_{2,max} = \frac{v_2 \cdot \dot{m}_{max}}{w_2} \quad (5.5)$$

$$S_{2,max} = \frac{0,897 \cdot \frac{10}{3}}{25}$$

$$S_{2,max} = \underline{\underline{0,1196[m^2]}}$$

5.2 Výpočet rozměrů dýzy

Rozsah měření je stanoven na dvanáct kroků po $1000[k_g \cdot h^{-1}]$. Z tohoto důvodu bude multi-dýzová stěna obsahovat dvanáct shodných dýz. Průtočný průřez jedné dýzy $S_2 [m^2]$ určíme z maximálního průtočného průřezu $S_{2,max} [m^2]$.

$$S_2 = \frac{S_{2,max}}{12}$$

$$S_2 = \frac{0,1196}{12}$$

$$S_2 = \underline{\underline{9,9667 \cdot 10^{-3} [m^2]}}$$

Výstupní průměr $d_2 [m]$ určíme z průtočného průřezu $S_2 [m^2]$, dle rovnice (5.6).

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot S_2}{\pi}} \quad (5.6)$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 9,9667 \cdot 10^{-3}}{\pi}}$$

$$d_2 = \underline{\underline{0,11265 [m]}}$$

Vstupní průměr $d_1 [m]$ se vypočítá z výstupního průměru $d_2 [m]$, úhlu zúžení $\alpha [^\circ]$ (zvoleno $\alpha = 12^\circ$) a zvolené činné délky dýzy $L = 100 [m]$, dle rovnice (5.7).

$$L = \frac{d_1 - d_2}{2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2}} \quad (5.7)$$

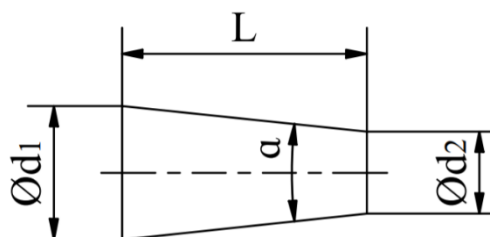
$$d_1 = \left(2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot L \right) + d_2$$

$$d_1 = \left(2 \cdot \tan \frac{12}{2} \cdot 0,1 \right) + 0,11265$$

$$d_1 = \underline{\underline{0,13367 [m]}}$$

Tab. 2: Tabulka vnitřních rozměrů dýzy (autor)

Vstupní průměr	d_1	0,13367	[m]
Výstupní průměr	d_2	0,11265	[m]
Činná délka	L	0,1	[m]
Úhel zúžení	α	12	[°]



5.3 Kontrola hmotnostních průtoků podle počtů dýz, dle rovnice (5.5)

Jednoduchými matematickými úpravami rovnice (5.5) je vyjádřen hmotnostní průtok. Následným dosazením jsou vypočteny hmotnostní průtoky od jedné otevřené dýzy až po všech dvanáct dýz. Tímto výpočtem bude zjištěno, zdali bude multi-dýzová stěna schopna pokrýt celý měřicí rozsah.

Tab. 3: Kontrolní výpočet dýz (autor)

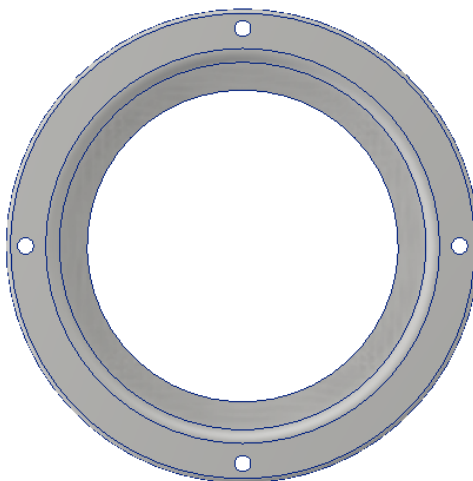
Počet otevřených dýz	$\dot{m} [kg \cdot s^{-1}]$	$\dot{m} [kg \cdot h^{-1}]$
1	0,27778	1000
2	0,55556	2000
3	0,83334	3000
4	1,11111	4000
5	1,38889	5000
6	1,66667	6000
7	1,94445	7000
8	2,22222	8000
9	2,50000	9000
10	2,77778	10000
11	3,05556	11000
12	3,33334	12000

Výpočty bylo zjištěno, že postupným otevíráním dýz je multi-dýzová stěna skutečně schopna pokrýt celý měřicí rozsah.

5.4 Návrh 3D modelu dýzy

Z vypočítaných veličin je v programu Autodesk Inventor Professional 2019 vytvořen model dýzy (viz Obr 5.1). Tloušťka dýz t [m] byla zvolena $t = 0,005$ [m]. Pro uchycení ve stěně je dýza navržena s osazením na největším průřezu s průchozími dírami pro 4 šrouby. Rozteč děr pro šrouby t_s [m] je zvolena $t_s = 0,157$ [m]. Dýza bude vyrobena z hliníku

z důvodu dlouhé životnosti materiálu, jeho nízké hmotnosti a tím pádem snadnější manipulaci s dýzami. Více parametrů je znázorněno ve výrobním výkresu v příloze B.



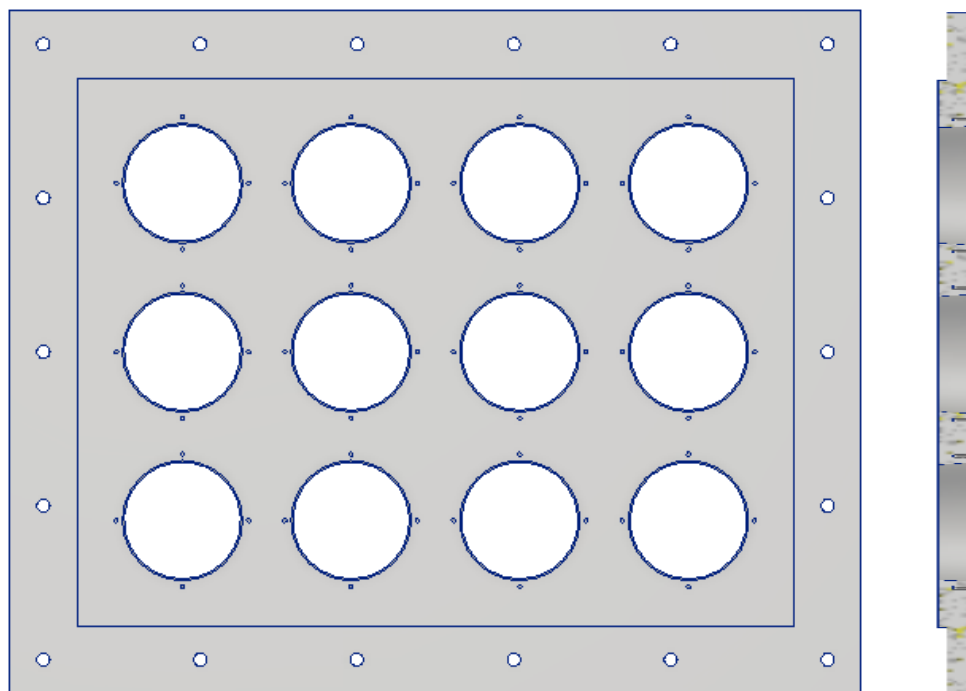
Obr. 5.1: 3D model dýzy – pohled zepředu (autor)



Obr. 5.2 3D model dýzy – pohled z boku (autor)

5.5 Návrh modelu dýzové stěny

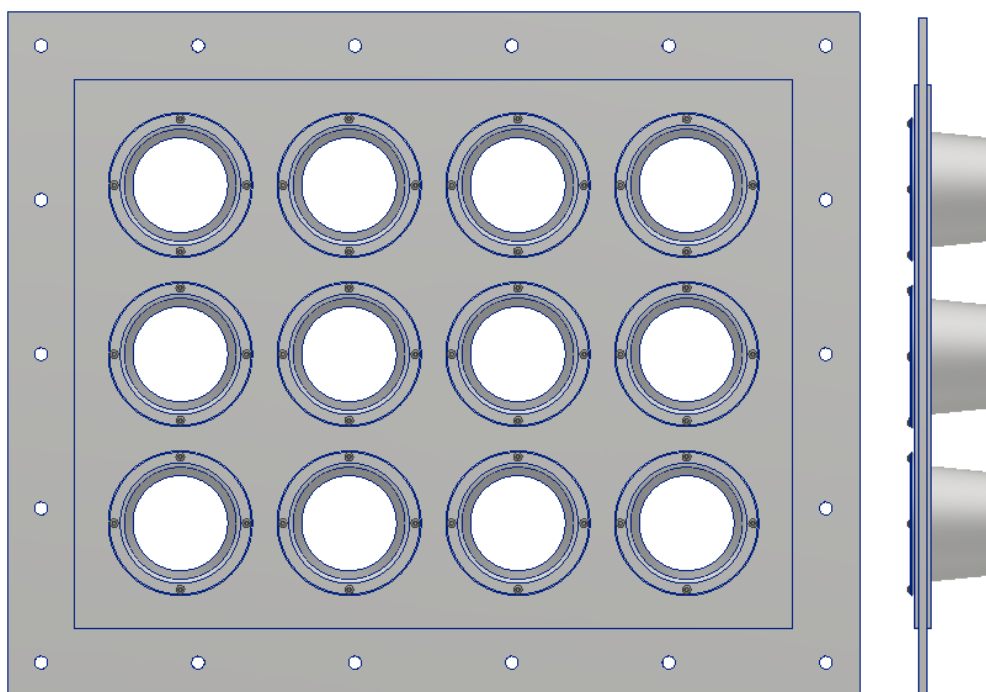
Rozměry dýzové stěny $a \times b \times c$ jsou zvoleny $0,85 \times 0,65 \times 0,02$ [m]. Po všech stranách jsou vyfrézovány drážky délky 0,08 [m] a šířky 0,01 [m] s průchozími dírami pro uchycení dýzové stěny mezi přírubami. Na následujícím obrázku je vidět model v programu Autodesk Inventor Professional 2019 (viz Obr. 5.3), kde je znázorněno rozložení děr pro dýzy a dírami se závitem pro uchycení dýzy. Rozteč t_d [m] mezi dýzami je zvolena $t_d = 0,2$ [m]. Dýzová stěna je vyrobena z hliníku, zejména kvůli jeho nízké hmotnosti, která by mohla při tak velké konstrukci působit problémy při montáži. Všechny zbývající parametry jsou znázorněny ve výrobním výkresu v příloze A.



Obr. 5.3: 3D model stěny – pohled zepředu a boční řez (autor)

5.6 Vytvoření sestavy multi-dýzové stěny

Dýzy byly spojeny se stěnou pomocí šroubů s půlkulatou hlavou s vnitřním šestihranem ISO 7380. Pro zlepšení těsnění je možno mezi dýzy a stěnu vložit kruhové těsnění či použít těsnící pásku. Výkres sestavy je v příloze C.



Obr. 5.4: 3D model sestavy – pohled zepředu a z boku (autor)

5.7 Návrh otevírání dýz při měření

Pokud neprobíhá měření a ve vzduchotechnickém potrubí neproudí pracovní médium, jsou dýzy uzavřeny plastovými ucpávkami vyrobenými na míru, jenž se budou při měření postupně otevírat.

Pro zajištění co nejlepšího proudění se dýzy při měření začínají otevírat ze středu až po kraje pro dodržení pokud možno co největší symetričnosti, aby nedocházelo k poruchám proudění. Na obrázku (viz Obr. 5.5) je návrh postupného otevírání od první dýzy až po dvanáctou.



Obr. 5.5: Návrh postupného otevírání dýz při měření (autor)

5.8 Montáž do vzduchotechnického potrubí

Jednou z možností je, že multi-dýzová stěna bude zvednuta ke vzduchotechnickému potrubí buď pomocí posuvného stojanu s hydraulickým zvedákem přivařeným okem na horní straně pro jeřáb, nebo pomocí manipulace několika osob.

Další možností je návrh stojanu, ve kterém bude multi-dýzová stěna uchycena a vzduchotechnické potrubí k ní bude navedeno.

Následně bude multi-dýzová stěna skrz průchozí díry uchycena mezi příruby pomocí šroubů. Mezi stěnu a příruby bude umístěna gumová lišta pro lepší těsnost vzduchotechnického potrubí.

Nezbytnou součástí vzduchotechnického potrubí bude manipulační okno před stěnou pro instalaci dýz a jejich otevírání či uzavírání pomocí plastových ucpávek.

Odběr tlaku před a za multi-dýzovou stěnou bude zajištěn pomocí odběrových otvorů ve vzduchotechnickém potrubí sloužících k zavedení sond statického tlaku. Tím je získán statická tlak před a za stěnou tzv. tlaková difference. Pokud budou zavedeny dva snímače statického tlaku, jeden před a druhý za stěnou, musí se počítat s chybou měření obou snímačů. Z tohoto důvodu je lepší použít pouze jeden snímač tlakové difference.

6. Závěr

V teoretické části této bakalářské práce jsem se nejdříve zabýval historií měření, popsal jsem největší významné pokroky v metrologii. Dále jsem se věnoval základním metodám měření, kde jsem vysvětlil základní pojmy z analyzované problematiky.

Dalším bodem teoretické práce bylo popsání druhů průtokoměrů, kde jsem nejdříve popsal objemové průtokoměry, poté průtokoměry s měřením tlakové difference, a to obzvláště průtokoměry ve formě škrťacích orgánů vložených do potrubí zcela vyplněného tekutinou. Závěrem této kapitoly jsem popisoval multidýzy, jenž jsou hlavním tématem této bakalářské práce.

V poslední části práce jsem se zabýval prouděním plynů a par dýzami, kde jsem již nebral dýzy jako měřidla, ale jako strojní součásti, ve kterých po celé délce dochází k expanznímu procesu.

V praktické části jsem ze všeho nejdříve vypočítal ze zadaných parametrů největší hmotnostní průtok, z čehož jsem dále určil vnitřní rozměry dýzy pro tento největší hmotnostní průtok. Dále je určil, kolik je třeba dýz na pokrytí celého rozsahu měření hmotnostních průtoků dle zadání. Dle toho jsem vypočítal vnitřní rozměry těchto dýz. Zbývající rozměry jsem vhodně zvolil a následně jsem vytvořil jejich 3D modely této v programu Autodesk Inventor Professional 2019. V dalším kroku jsem navrhnul stěnu, ve které budou dýzy uchyceny. Vytvořil jsem 3D model sestavy. Dále jsem navrhnul montáž multi-dýzové stěny do vzduchotechnického potrubí a na úplný závěr jsem vypracoval výkresovou dokumentaci multi-dýzové stěny.

Poděkování

Především chci poděkovat svému vedoucímu Ing. Zdeňkovi Šmídovi, Ph.D. za odborné rady a neskutečnou trpělivost, jakou se mnou měl. Dále bych rád poděkovat své rodině za veškerou motivaci a podporu. A nakonec bych chtěl poděkovat ještě svým přátelům za podporu při tvorbě bakalářské práce i za podporu v průběhu studia.

V Ostravě 18.05.2020



.....
podpis studenta

7. Seznam použité literatury

- [1] Medlock, R. S. (1986). The Historical Development of Flow Metering. *Measurement and Control*, 19(5), 11–22. <https://doi.org/10.1177/002029408601900502>
- [2] ŠINDELÁŘ, Václav a Zdeněk TŮMA. Metrologie: její vývoj a současnost. Praha: Česká metrologická společnost, 2002. Učební příručka ČMS.
- [3] , Doc. Ing. Josef Jenčík, CSc., Principy měření průtoku a množství tekutin. *Automa* [online]. 2002 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/principy-mereni-prutoku-a-mnozstvi-tekutin-2002_02_28336_320/
- [4] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin, díl 3. ISBN 80-7300-156-X.
- [5] AUTOMA: časopis pro automatizační techniku. [cit. 2018-01-06]. Dostupný z WWW:<<http://automa.cz/download/au100605.pdf>>
- [6] , Doc. Ing. Karel Kadlec, CSc. a Doc. Ing. Miloš Kmínek, CSc. MĚŘICÍ A ŘÍDICÍ TECHNIKA [online]. 2.01, únor 2005. VYSOKÁ ŠKOLA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ V PRAZE FAKULTA CHEMICKO-INŽENÝRSKÁ, 2000 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/mrt/F4/F4k45-prut.htm#k4521>
- [7] Bc. Marie Štarhová Posouzení metody využívající přenosnou měřicí sestavu s průtokoměrem. Brno, 2018. 135 s., 32 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Michal Žoužela, Ph.D
- [8] JENČÍK, Josef, VOLF Jaromír a kolektiv. Technická měření. Vydavatelství ČVUT – 2000 v Praze. ISBN: 9788001021385
- [9] , Ing. Soňa Orlíková. Měření průtoku tekutin - principy průtokoměrů. *Elektrorevue* [online]. 2001 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: http://www.elektrorevue.cz/clanky/01049/index.html#_M%C4%9B%C5%99en%C3%AD_objemov%C3%A9ho_pr%C5%AFtoku
- [10] , Mgr. Magda Králová. PROUDĚNÍ TEKUTIN. [Http://edu.techmania.cz/](http://edu.techmania.cz/) [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/tekutiny/proud-eni-tekutin>
- [11] , Bela G. Liptak. Instrument Engineers' Handbook, Volume One: Process Measurement and Analysis. 4, ilustrované vydání, přepracované vydání. CRC Press, 2003. ISBN 1420064029.

- [12] , Ing. Milan Kříž. Příklady měřících metod průtoku. [Http://www.prutoky.cz/](http://www.prutoky.cz/) [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://www.prutoky.cz/kapaliny/teorie/priklady-mericich-metod/#kpm-ppt>
- [13] MULTIDÝZY. [Https://mattech.cz/](https://mattech.cz/) [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://mattech.cz/produkty/multidyzy-154/>
- [14] Fyzikální vlastnosti vzduchu. [Http://www.converter.cz/](http://www.converter.cz/) [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>
- [15] Doporučené rychlosti v potrubí. [Https://www.maflex.cz/](https://www.maflex.cz/) [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.maflex.cz/technicka-pomoc/doporucene-rychlosti-v-potrubu/>
- [16] ŠMÍDA, J. Zkušební trať s proudovým kompresorem: diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2016, 76 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Kamil Kolarčík, CSc.
- [17] Vitouchová, Veronika. Evangelista Torricelli. Informace [online]. 2018, č.3 [cit.2020-05-15]. ISSN 1805-2800. Dostupné z: https://www.lib.cas.cz/casopis_informace/evangelista-torricelli/
- [18] , Mgr. Magda Králová. DANIEL I. BERNOULLI. Edu.techmania [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/vedec/1058/bernoulli>
- [19] Multi-nozzle balanced flow meter. China. CN105526980A.
- [20] ŠKORPÍK, Jiří. Proudění plynů a par tryskami, Transformační technologie, 2006-02, [last updated 2020-01-31]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/40.html>.
- [21] WENZEL, R. Návrh proudového kompresoru pro odsávání vysokopecního plynu: Diplomová práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, katedra energetiky, 2017, 50 s. Vedoucí práce: Kolarčík, K.
- [22] ZEMAN, Radek. Proudění plynů a par. [Https://onlineschool.cz/](https://onlineschool.cz/) [online]. 2020 [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://onlineschool.cz/termomechanika/proudeni-plynu-a-par-uvod/>
- [23] MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics – First Edition. New York: John Wiley & Sons, 1990, 840 p. ISBN: 0-471-57117-2.

8. Seznam příloh

Příloha A – Výrobní výkres JUR0363_001: Stěna

Příloha B – Výrobní výkres JUR0363_002: Zúžená dýza

Příloha C – Výkres sestavy JUR0363_003: Multi-dýzová stěna